



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

Centro de Tecnologia

Departamento de Engenharia Mecânica

Curso de Graduação em Engenharia Mecânica

MOACIR GOMES DUARTE FILHO

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM GRUPO GERADOR A DIESEL OPERANDO  
COMO DUAL (DIESEL E GÁS NATURAL)

João Pessoa

2018

MOACIR GOMES DUARTE FILHO

Trabalho de conclusão de curso  
submetido ao corpo docente do  
Curso de Graduação em Engenharia  
Mecânica da Universidade Federal  
da Paraíba, como parte dos requisitos  
para a obtenção do título de Bacharel  
em Engenharia Mecânica.

Orientador: Profº. Dr. Emerson  
Freitas Jaguaribe

João Pessoa

2018

## MOACIR GOMES DUARTE FILHO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado pelo acadêmico MOACIR GOMES DUARTE FILHO, do Curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica, da Universidade Federal da Paraíba - UFPB, tendo obtido o conceito \_\_\_\_\_, conforme a apreciação da Banca Examinadora:

Aprovado em \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2018

## BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Emerson Freitas Jaguaribe  
Orientador (Universidade Federal da Paraíba - UFPB)

---

Prof. Dr. Adriano Sitônio Rumão  
Membro (Universidade Federal da Paraíba)

---

Prof. Dr. Bruno Leonardo Campêlo de Queiroga  
Membro (Universidade Federal da Paraíba)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por conceder a oportunidade de estar aqui.

Aos meus pais, Moacir e Elizabete, por todo apoio, educação e carinho recebidos.

A minhas irmãs, Maria Thereza e Maria Graziela, e minha namorada Ariane Camila, por tornarem o caminho mais prazeroso, pelo amor e conselhos dados.

Ao meu orientador, Dr. Emerson Freitas Jaguaribe, pela disponibilidade, tempo, paciência e extraordinário conhecimento compartilhado.

Ao professor Dr. Adriano Sitônio Rumão, pelos ensinamentos dados nas minhas atividades acadêmicas, e a disponibilidade.

Ao professor Dr. Bruno Leonardo Campêlo de Queiroga, pelos ensinamentos através das suas disciplinas lecionadas, e pela disponibilidade na banca.

Ao doutorando André Filipe Mendes Alves, pela ajuda, e compartilhamento de conhecimento.

A toda equipe do Laboratório de Inovação da UFPB, pela disponibilidade e ajuda concedida.

Por fim agradeço aos colegas de curso, por todo esse tempo de companheirismo, em especial Andreza, Iago Antas, Mônica Santos, Yago Ferreira e Yago Medeiros.

## RESUMO

O presente trabalho traz a análise de rendimento térmico de um Grupo Gerador originalmente Diesel, operando como *Dual* (Diesel e Gás Natural). O estudo foi conduzido em um Grupo Gerador Diesel MDG-5000CLE, o qual foi adaptado para o funcionamento com dois combustíveis, Diesel e Gás Natural. Na realização do estudo, houve a necessidade de se modificar o coletor de admissão do motor para permitir a admissão do ar, como também, do gás natural. Tal alteração foi possível com a instalação de um kit *Dual Fuel*, composto de um difusor, uma válvula controladora de fluxo, um motor de passo, e um sistema de controle de gás com Arduino. Para a simulação das cargas impostas ao gerador, foi elaborado no Laboratório de Inovação da UFPB, um banco de cargas resistivo, com dez resistências de 500 W cada, ligadas em paralelo.

A realização dos testes fundamentou-se em duas etapas. Inicialmente, os testes com o grupo Gerador foram realizados usando-se apenas diesel, e posteriormente, no modo *Dual*. Durante os testes os valores de consumo específico de combustível e de gás natural, bem como níveis de ruídos e de opacidade dos gases de escape, foram registrados para efeito de comparação posterior. Os testes consistiam na imposição de cargas pré-determinadas ao gerador em ambos modos de operação, que corresponderam a 1,14; 2,14; 3,25; 4,24; 4,69 kW. Com os testes concluídos e as comparações realizadas, constatou-se que o limite de substituição de Diesel por Gás Natural cresce à medida que a potência aumenta, chegando a substituição máxima de 85,10%, na potência máxima, de 4,69 kW. De forma semelhante, observou-se que o rendimento térmico do grupo gerador cresce com o aumento da potência. Percebeu-se ainda, pouca variação dos níveis de opacidade do ar em relação à potência.

Palavras-chave: Grupo Gerador. Kit *Dual Fuel*. Gás Natural. Modo Dual. Ciclo Diesel.

## **ABSTRACT**

The present work brings the thermal performance analysis of a Generator Group originally Diesel, operating as Dual (Diesel and natural gas). The study was conducted in an MDG-5000CLE Diesel Generator Set, which was adapted for operation with two fuels, Diesel and Natural Gas. In the study, it was necessary to modify the intake manifold of the engine to allow the admission of air but also of natural gas. This change was possible with the installation of a Dual Fuel kit, consisting of a diffuser, a flow control valve, a stepper motor, and the Arduino gas control system. For the simulation of the loads imposed on the generator, was developed at the Laboratório de Inovação of the UFPB, a resistive load bank with ten resistors of 500 W each connected in parallel.

The tests were based on two stages. Initially, the tests with the Generator group were performed using only diesel, and later, in Dual mode. During the tests, the fuel consumption and natural gas consumption values, as well as noise levels and exhaust gas opacity, were recorded for comparison purposes. The tests consisted of the imposition of predetermined loads on the generator in both modes of operation, which corresponded to 1.14; 2.14; 3.25; 4.24; 4.69 kW. With the tests completed and the comparisons made, it was verified that the limit of substitution of Diesel by Natural Gas grows as the power increases, reaching the maximum substitution of 85.10%, in the maximum power, of 4,69 kW . In a similar way, it was observed that the thermal efficiency of the generating set increases with increasing power. There was still little variation in noise levels and opacity of air in relation to power.

**Keywords:** Generator Group. Dual Fuel Kit. Natural gas. Dual Mode. Diesel cycle.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – O Processo de Admissão dos motores Diesel aspirado.....	13
Figura 2 - O Processo de Admissão nos motores Diesel turbo alimentado. ....	14
Figura 3 – O Processo de Compressão nos motores Diesel. ....	14
Figura 4 - O Processo de Combustão nos motores Diesel.....	15
Figura 5 - O Processo de Escape nos motores Diesel.....	15
Figura 6 – Sistema de aspiração natural. ....	17
Figura 7 – Sistema de alimentação turboalimentado.....	17
Figura 8 – Esquema de Funcionamento do ar no turbocompressor. ....	18
Figura 9 - Circuito do sistema de alimentação de combustível do ciclo Diesel. ....	19
Figura 10 - Diagrama P-v do ciclo diesel ideal. ....	20
Figura 11 – Diagrama P-v do ciclo diesel real. ....	21
Figura 12 - Admissão de combustível gasoso através do coletor de admissão. ....	23
Figura 13 – Esquema do kit <i>Dual Fuel</i> .....	25
Figura 14 – Grupo gerador MDG 5000-CLE. ....	28
Figura 15 – Componentes do kit Dual Fuel no motor MDG 5000-CLE.....	29
Figura 16 – Ilustração do movimento da cunha da válvula controladora de fluxo. ....	30
Figura 17 – O banco de carga utilizado.....	31
Figura 18 – Analisador de energia.....	31
Figura 19 – (A) Recipiente graduado e (B) tubo em U. ....	32
Figura 20 – Sistema de medição volumétrica de gás natural. ....	33
Figura 21 – O opacímetro utilizado.....	34
Figura 22 – Limites de substituição do diesel em função da potência. ....	37
Figura 23 – Comparação entre consumo específico e potência para o modo original e dual .....	38
Figura 24 – Comparação entre os rendimentos térmico no modo original e dual.....	39
Figura 25 – Opacidade dos gases de escape em relação à potência para os modos original e dual.....	40
Figura 26 – Custo com combustível em função da potência para o modo original e dual. .....	41

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Composição do Gás Natural. ....	24
Tabela 2 – Especificações do Grupo gerador MDG 5000-CLE. ....	28
Tabela 3 – O consumo de combustível no modo original e no modo dual em relação a potência, e seus respectivos tempos de consumo. ....	36



## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
2 OBJETIVO .....	12
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	13
3.1 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA DO CICLO DIESEL.....	13
3.1.1 SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE AR .....	16
3.1.2 SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE COMBUSTÍVEL .....	18
3.1.3 O PROCESSO IDEAL X REAL .....	19
3.1.4 DESEMPENHO DOS MOTORES DIESEL.....	21
3.1.4.1 <i>Rendimento térmico</i> .....	21
3.1.4.2 <i>Consumo específico de combustível</i> .....	22
3.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE MOTORES DUAIS .....	22
3.2.1 GÁS NATURAL.....	23
3.2.2 O KIT DUAL FUEL .....	24
3.2.3 DESEMPENHO DE MOTORES DUAIS .....	26
3.2.3.1 <i>Substituição limite do diesel por gás natural</i> .....	26
3.2.3.2 <i>Rendimento térmico</i> .....	27
3.2.3.3 <i>Consumo específico de combustível</i> .....	27
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
4.1 MONTAGEM DO APARATO EXPERIMENTAL .....	28
4.1.1 MOTOR UTILIZADO .....	28
4.1.2 KIT DUAL FUEL DESENVOLVIDO.....	29
4.1.3 BANCO DE CARGA E ANALISADOR DE ENERGIA UTILIZADOS .....	30
4.1.4 SISTEMA DE MEDIÇÃO DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL.....	32
4.1.5 SISTEMA DE MEDIÇÃO DE CONSUMO DE GÁS NATURAL .....	32
4.1.6 MEDIÇÃO DA OPACIDADE DOS GASES DE ESCAPE.....	33

4.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	34
4.2.1 TESTE DE DESEMPENHO DO GRUPO GERADOR MDG-5000CLE COM DIESEL .....	34
4.2.2 TESTE DE DESEMPENHO DO GRUPO GERADOR MDG-5000CLE DUAL (DIESEL + GÁS NATURAL).....	35
5 RESULTADO E DISCUSSÃO.....	36
5.1 TESTES DE DESEMPENHO NO GRUPO GERADOR MDG-5000CLE.....	36
5.1.1 OS LIMITES DE SUBSTITUIÇÃO DO DIESEL POR GÁS NATURAL EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA .....	36
5.1.2 CONSUMO ESPECIFICO DE COMBUSTÍVEL <i>VERSUS</i> POTÊNCIA.....	37
5.1.3 RENDIMENTO TÉRMICO <i>VERSUS</i> POTÊNCIA .....	38
5.1.4 A OPACIDADE DOS GASES <i>VERSUS</i> POTÊNCIA .....	39
5.2 CUSTO DOS COMBUSTÍVEIS <i>VERSUS</i> POTÊNCIA, NO MODO ORIGINAL E DUAL .....	40
6 CONCLUSÃO.....	42
REFERENCIAS .....	43

## 1 INTRODUÇÃO

O consumo de energia é um dos principais indicadores do desenvolvimento econômico e do nível de qualidade de vida de qualquer sociedade. Ele reflete tanto o ritmo de atividade dos setores industrial, comercial e de serviços, quanto a capacidade da população para adquirir bens e serviços de tecnologia cada vez mais avançada, como automóveis, eletrodomésticos e eletroeletrônicos (que exigem acesso à rede elétrica e pressionam o consumo de energia).

O Brasil sendo um dos países, no mundo, com grande consumo de energia, compreende a necessidade de adotar políticas visando o consumo de energia eficiente, seja através de práticas educativas para a população, ou por meio de incentivo a novas pesquisas relacionadas a área, que permita a transição da energia advinda do petróleo para as energias alternativas, como por exemplo, o gás natural.

Um dos combustíveis que encabeçam o ranking de mais utilizados no Brasil, é o óleo Diesel. O mesmo foi responsável pela maior percentagem de uso no ano de 2017, com cerca de 18% (Balanço Energético Nacional 2018, ano base 2017. – Ministério de Minas e Energia). Tal elevado percentual deve-se ao seu uso muito diverso, onde tem aplicações nos setores rodoviário (carro, ônibus, furgões e caminhões) e industrial (utilizado em geradores elétricos e caldeiras).

Apesar de seu vasto uso, por questão de atualização de preços, causou recentemente, problemas de paralização no País. Considerando, também, ser agente poluidor, pesquisadores do Laboratório de Inovação (LI) da UFPB, desenvolvem alternativas viáveis de uso dos combustíveis, buscando soluções mais baratas e práticas às encontradas no mercado, como o kit *Dual Fuel*. Este kit proporciona a máxima substituição de diesel por gás natural de maneira automatizada. Sua instalação no motor é simples, sem que seja necessário realizar qualquer mudança no motor original. Essa iniciativa do LI vai de encontro a ampliação do mercado brasileiro de óleo e de gás que segundo dados do Instituto Brasileiro de Petróleo, deve movimentar cerca R\$ 285 bilhões no país entre 2017 e 2020, o que corresponde a 59% das perspectivas de investimento da indústria brasileira.

## 2 OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo a análise de desempenho de um Grupo Gerador MDG-5000CLE operando em seu modo original (Diesel), e também em modo *Dual* (Diesel e Gás Natural).

A análise de desempenho se dará através de dados de consumo específico de Diesel e Gás Natural coletados, e também, por níveis de opacidade dos gases de escape. Ainda no modo *Dual*, verifica-se os limites de substituição máxima de diesel por Gás Natural.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA DO CICLO DIESEL

Os motores de combustão interna do ciclo Diesel são máquinas térmicas que produzem energia mecânica de eixo a partir da energia química contida no combustível (WYLEN, 2003). A forma mais habitual de se fazer essa conversão de energia é por meio da configuração dos motores alternativos cuja principal característica é o movimento alternado de um pistão no interior de um cilindro, o qual é transformado em um movimento rotativo por um sistema biela-manivela (BRUNETTI, 2012). O movimento do pistão é ocasionado devido a um ciclo formado pela sequência de quatro processos que são: admissão, compressão, expansão/combustão e exaustão.

A admissão dos motores Diesel de quatro tempos pode ocorrer de duas maneiras de acordo com a sua configuração. Nos motores aspirados, após a abertura da válvula de admissão, o ar é admitido devido a pressão atmosférica e ao movimento descendente do pistão, onde o mesmo sai do PMS<sup>1</sup> ao PMI<sup>2</sup> (Ver Figura 1). Já nos motores turboalimentados, o ar é pré-comprimido por um turbocompressor, e distribuído através do coletor de admissão ao interior dos cilindros, após abertura da válvula de admissão (Ver Figura 2).

Figura 1 – O Processo de Admissão dos motores Diesel aspirado.



Fonte: adaptada de [http://maquinasemotoresnapesca.blogspot.com/p/blog-page\\_21.html](http://maquinasemotoresnapesca.blogspot.com/p/blog-page_21.html)

<sup>1</sup> PMS: é a posição na qual o pistão está no ponto mais alto do interior do cilindro.

<sup>2</sup> PMI: é a posição na qual o pistão está no ponto mais baixo do interior do cilindro.

Figura 2 - O Processo de Admissão nos motores Diesel turbo alimentado.



Fonte: adaptada de <http://carros.hsw.uol.com.br/turbocompressores.html>.

A compressão nos motores Diesel de quatro tempos ocorre após a admissão, onde as válvulas de admissão e compressão estão fechadas, e o pistão parte do PMI ao PMS (Ver Figura 3). A medida que o ar é comprimido pelo movimento ascendente do pistão, a temperatura do mesmo eleva-se. Nos motores a diesel, apenas o ar é comprimido durante o tempo de compressão, eliminando assim a possibilidade de autoignição.

Figura 3 – O Processo de Compressão nos motores Diesel.



Fonte: adaptada de [http://maquinasemotoresnapesca.blogspot.com/p/blog-page\\_21.html](http://maquinasemotoresnapesca.blogspot.com/p/blog-page_21.html)

Após terminado o processo de compressão, inicia-se a combustão/expansão. Nesta etapa, o interior do cilindro encontra-se com ar à alta temperatura, sendo maior do que a

de autoignição do diesel. No mesmo instante, o diesel é injetado pelo bico injetor do sistema de injeção do motor, ocorrendo assim a combustão. Devido à explosão da combustão, uma grande força ocasionada pelo aumento de pressão empurra o pistão para o PMI, realizando assim trabalho ao motor (Ver Figura 4).

Figura 4 - O Processo de Combustão nos motores Diesel.



Fonte: adaptada de [http://maquinasemotoresnapesca.blogspot.com/p/blog-page\\_21.html](http://maquinasemotoresnapesca.blogspot.com/p/blog-page_21.html)

Ocorrida a combustão/expansão, a válvula de escape é aberta, proporcionando a descarga dos gases proveniente da queima, logo, conclui-se o ciclo com a quarta etapa, a exaustão (Ver Figura 5). Após esse processo, inicia-se novamente o ciclo com a admissão.

Figura 5 - O Processo de Escape nos motores Diesel.



Fonte: adaptada de [http://maquinasemotoresnapesca.blogspot.com/p/blog-page\\_21.html](http://maquinasemotoresnapesca.blogspot.com/p/blog-page_21.html)

### 3.1.1 SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE AR

O sistema de alimentação de ar do motor é utilizado para garantir a injeção de ar na câmara de combustão na quantidade correta, e com qualidade que permita o melhor funcionamento do motor. O ar que o motor aspira deve passar por filtros de boa qualidade para garantir a retenção de impurezas que acompanham o ar.

O filtro de ar deve garantir que contaminantes, como poeira, fuligem, areia e demais impurezas presentes no ar sejam admitidas ao motor, evitando assim o desgaste prematuro dos componentes moveis do motor, e prolongando sua vida útil.

Para garantia de uma boa filtragem os filtros acoplados aos motores podem trabalhar em conjunto com os seguintes subsistemas:

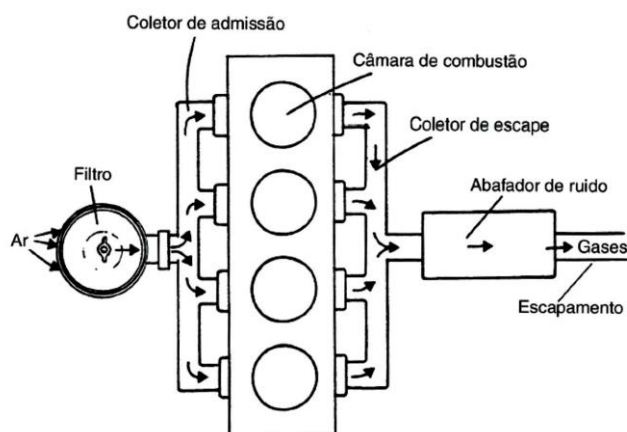
- **Filtro banho de óleo:** para retenção de impurezas maiores, como folhas, partículas de terras, etc. Neste filtro, o ar entra junto com as partículas indesejadas, que são retiradas por um pré-purificador, e são conduzidas a um copo de sedimentação. O ar segue até a cuba de óleo entrando em contato com o mesmo e garantindo que partículas menores fiquem retidas nele. O ar acompanhado de gotículas menores de óleo segue até elementos filtrantes onde nesse momento são separados, e o ar segue aos cilindros pelo canal de admissão;
- **Filtro seco:** as impurezas maiores são separadas através de um movimento circular do ar causado por uma força centrífuga. Em seguida o ar passa pelo os elementos filtrantes de papel e feltro, retendo assim as partículas menores e conduzindo o ar aos cilindros.

Nos motores Diesel os sistemas mais utilizados são o de aspiração natural e forçada (turbo-alimentada).

Na aspiração natural, o ar que é admitido passa primeiramente pelos filtros, e através do coletor de admissão, devido ao movimento descendente do pistão, chega aos cilindros. Após a combustão, no processo de exaustão, os gases formados são forçados a sair do cilindro pelo coletor de escapamento (Ver Figura 6).



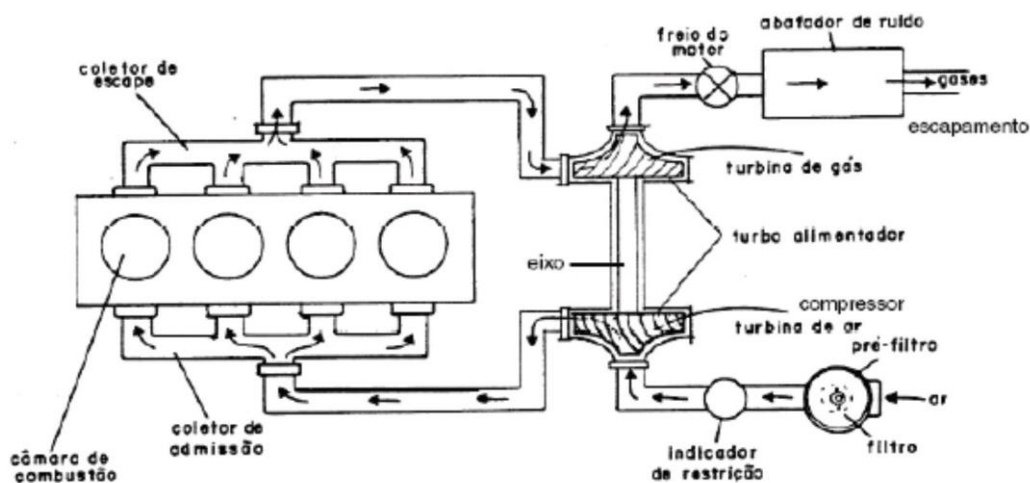
Figura 6 – Sistema de aspiração natural.



Fonte: MWM International, 2009.

No sistema de aspiração forçada, o ar é pré-comprimido pelo **turbo compressor** e encaminhado através do coletor de admissão ao interior dos cilindros. A pressão do ar pré-comprimido é maior do que as praticadas no sistema de aspiração natural. Após a combustão e formação dos gases provenientes dela, ocorre no escape, a expulsão dos gases do interior dos cilindros, os quais são encaminhados para turbina (Ver Figura 7).

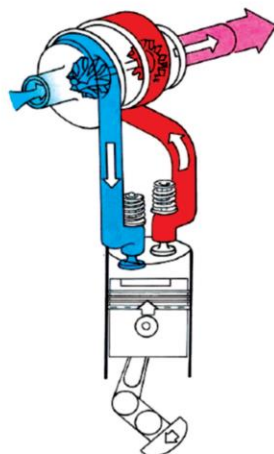
Figura 7 – Sistema de alimentação turboalimentado.



Fonte: MWM International, 2009.

É o fluxo de gases de escape que aciona a turbina bem como o compressor, o qual eleva a pressão do ar que entra através do filtro, melhorando a alimentação do motor (Ver Figura 8).

Figura 8 – Esquema de Funcionamento do ar no turbocompressor.



Fonte: Mercedes Benz do Brasil, 2006.

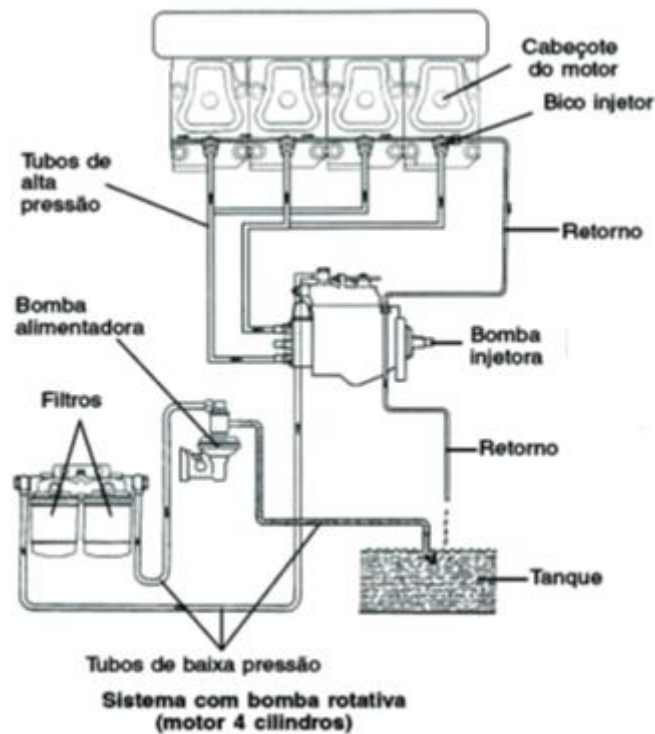
### 3.1.2 SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE COMBUSTÍVEL

O sistema de alimentação garante o fornecimento de combustível na quantidade certa e pressão recomendada, ao motor.

Nos motores Diesel, o sistema de alimentação é composto por reservatório de combustível, tubulação de alta e baixa pressão, tubulação de retorno, bomba de combustível, filtros, bomba injetora, bicos injetores, etc (Ver Figura 9).

O combustível é sugado do reservatório ou tanque através da bomba alimentadora, passa pelos filtros, e segue até a bomba injetora. Na bomba injetora, o combustível ganha pressão e é enviado a cada cilindro no momento exato da injeção. Para garantir o perfeito funcionamento do motor, a quantidade enviada de combustível é maior que a necessária, retornando o excesso pela tubulação de retorno.

Figura 9 - Circuito do sistema de alimentação de combustível do ciclo Diesel.



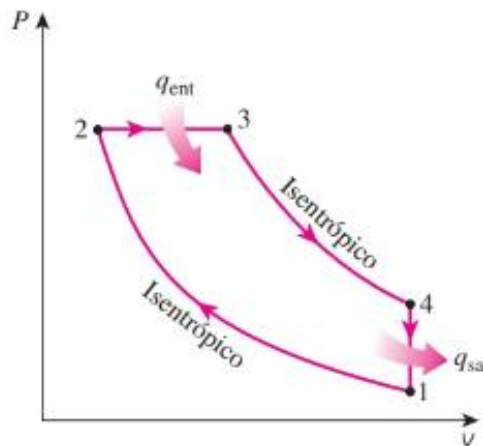
Fonte: Mercedes Benz do Brasil, 2006.

### 3.1.3 O PROCESSO IDEAL X REAL

O ciclo Diesel apresentado na Fig. 10 é o ideal, ou seja, não são consideradas as perdas (calor e atrito) que ocorrem no processo. Onde se tem:

- 1 – 2: Compressão Isentrópica (entropia constante);
- 2 – 3: Fornecimento de calor,  $q_{ent}$ , (pressão constante);
- 3 – 4: Expansão Isentrópica;
- 4 – 1: Rejeição de calor,  $q_{sai}$ , (volume constante).

Figura 10 - Diagrama P-v do ciclo diesel ideal.

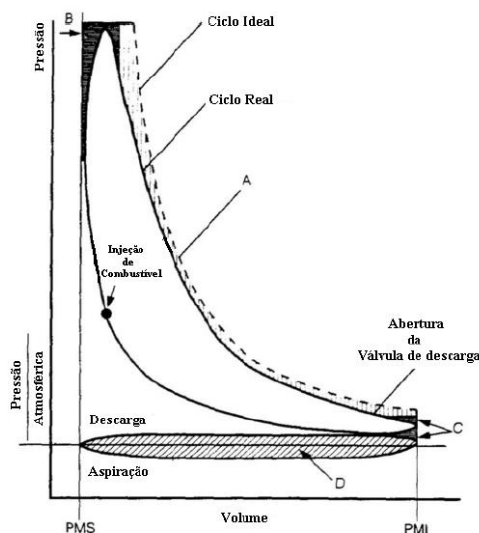


Fonte: Adaptada de TERMODINÂMICA 7ª Edição (Çengel e Boles).

Uma vez que na prática (real) os processos não ocorrem a volume e pressão constante, ocorrem, então, as perdas, diferenciando o processo real do ideal (Ver Figura 11). Nota-se então, que no ciclo Diesel real existem perdas específicas em determinados momentos, os quais serão explicadas a seguir:

- Região A: perdas ocorridas durante a expansão, provocada pela troca de calor com o sistema de arrefecimento do motor;
- Região B: perdas ocorridas durante a ignição devido a combustão do diesel não ser instantânea;
- Região C: perdas relacionada a abertura precoce da válvula de descarga;
- Região D: perdas advindas do bombeamento do ar, nos processos de admissão e descarga.

Figura 11 – Diagrama P-v do ciclo diesel real.



Fonte: Barros, 2006.

### 3.1.4 DESEMPENHO DOS MOTORES DIESEL

Para efeito de comparações de desempenho, é utilizado nos motores Diesel alguns parâmetros como, rendimento térmico, emissões gasosas e de ruídos.

#### 3.1.4.1 Rendimento térmico

O rendimento térmico dos motores Diesel é definido pela razão entre a energia produzida e a energia consumida, ou seja, é a relação entre a energia de eixo do motor e a energia liberada na combustão do diesel (WYLEN, 2003).

Caso o motor Diesel faça parte de um grupo gerador, considera-se, no cálculo do rendimento térmico, a potência elétrica gerada como a potência produzida. O rendimento térmico do grupo gerador Diesel,  $\eta_o$ , é calculado pela Eq. (1).

$$\eta_o = \frac{PP}{PCI_d \cdot Vol_d \cdot \rho_d} \quad (1)$$

onde  $PP$  é a potência produzida,  $PCI_d$  é o poder calorífico inferior do diesel,  $Vol_d$  é o volume de diesel consumido por unidade de tempo e  $\rho_d$  é a massa específica do diesel.

### 3.1.4.2 Consumo específico de combustível

O consumo específico de combustível (*cec*) de um motor Diesel é expresso pela razão entre o consumo mássico de diesel ( $CM_d$ ) e a potência produzida ( $PP$ ), ver Eq. (2).

$$cec = \frac{CM_d}{PP} \quad (2)$$

## 3.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE MOTORES DUAIS

O motor de combustão interna operando como *dual*, consiste num motor capaz de consumir dois tipos de combustíveis, sendo, normalmente, um líquido e um gasoso (FIGUEIRAL, 2016). Comumente, emprega-se tal técnica em motores Diesel, visto que seu ciclo de funcionamento permite adicionar outro tipo de combustível de forma simples, sem modificar sua estrutura original (ALVES, 2018).

Nos motores Diesel, quando alterados para dual, o combustível líquido é o responsável pela fonte de combustão para o restante de combustível gasoso introduzido na câmara de combustão. O óleo diesel atua como combustível secundário, sendo essencial para o desenvolvimento da combustão, e o combustível gasoso atua como primário, fornecendo a maior quantidade de calor para funcionamento do motor. Reforça-se que, como o óleo diesel é essencial para combustão, não há possibilidade de funcionamento do motor somente com combustível primário no modo dual.

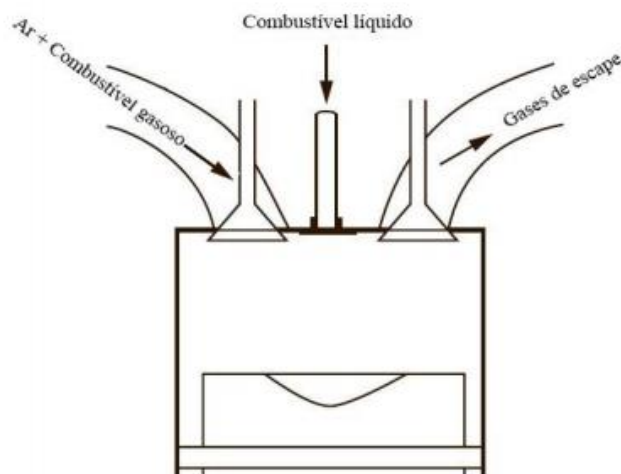
A admissão do combustível gasoso se dá, muitas vezes, através do coletor de admissão, o que possibilita uma boa combinação do ar com o combustível (Ver Figura 12). A quantidade de combustível gasoso inserida no coletor é limitada por condições de mau funcionamento do motor Diesel, como o *misfire*<sup>3</sup> e o *knock*<sup>4</sup>.

---

<sup>3</sup> Combustão incompleta nos motores Diesel, no modo de operação dual, devido à injeção de quantidades insuficientes de diesel (SHENGHUA, 2003).

<sup>4</sup> Tipo de combustão indesejável nos motores duais que leva ao desgaste prematuro de diversos componentes do motor (ZOLTOWSKI, 2014).

Figura 12 - Admissão de combustível gasoso através do coletor de admissão.



Fonte: G. A. Karim, Gas- Fueled Engines, 2015.

Os combustíveis gasosos mais utilizados no modo dual são: gás pobre, gás liquefeito de petróleo, biogás e gás natural. O combustível gasoso utilizado no presente trabalho foi o gás natural.

### 3.2.1 GÁS NATURAL

O gás natural é uma substância composta por hidrocarbonetos que permanecem em estado gasoso nas condições atmosféricas normais (ANP, 2018). Apesar de ser um combustível fóssil, possui a razão Hidrogênio/Carbono maior do que outros combustíveis derivados do petróleo, o que o torna a sua combustão mais limpa (ALVES, 2018).

O gás natural produzido no Brasil é predominantemente de origem associada ao petróleo e se destina a diversos mercados de consumo, sendo os principais, a geração de energia termelétrica e os segmentos industriais.

Sua composição é basicamente de hidrocarbonetos metano ( $\text{CH}_4$ ), com teores acima de 70%, seguida de etano ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ) e, em menores proporções, o propano ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ), usualmente com teores abaixo de 2%, dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e o Nitrogênio (N), como ilustra a tabela abaixo (Tabela 1).

Tabela 1 – Composição do Gás Natural.

<b>Composição Média do Gás Natural da PBGÁS</b>	<b>% Vol</b>
<b>Metano (CH<sub>4</sub>)</b>	90,09
<b>Etano (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>)</b>	0,84
<b>Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)</b>	1,56
<b>Nitrogênio (N)</b>	1,35
<b>Propano (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)</b>	0,16

Fonte: Adaptada de [http://www.pbgas.com.br/?page\\_id=195](http://www.pbgas.com.br/?page_id=195)

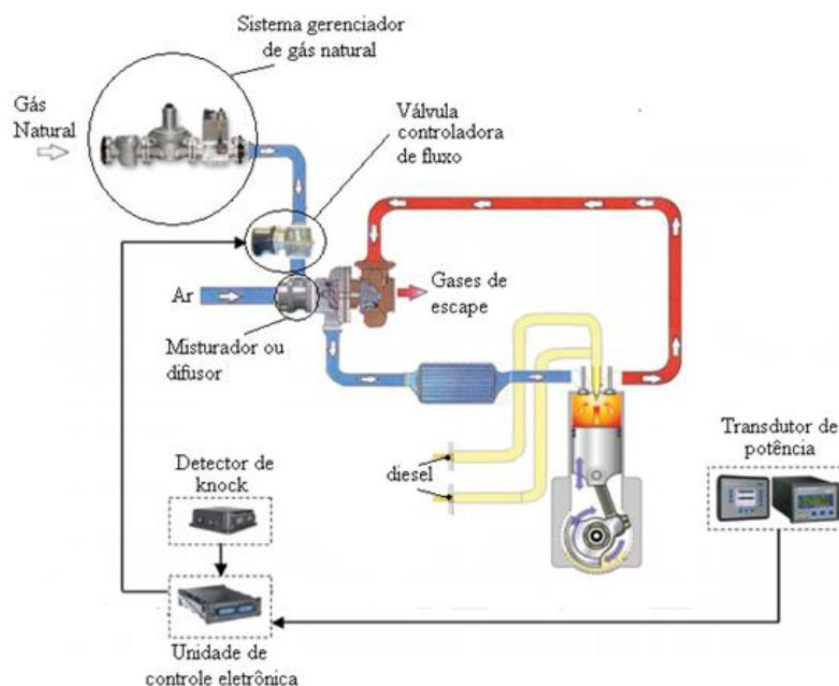
Uma das principais características do gás natural é ter a massa específica menor do que a do ar, permitindo a sua dissipação, evitando assim acidentes em decorrência do seu vazamento.

### 3.2.2 O KIT DUAL FUEL

A instalação do kit *Dual Fuel* no motor Diesel é possível sem que se faça necessária qualquer tipo de alteração em sua configuração original. Pode funcionar apenas com Diesel, ou com diesel e Gás Natural.

Mediante os sinais de frequência provindos do funcionamento do motor, é possível através do kit *Dual Fuel*, interferir na dosagem de gás natural fornecido ao motor. No mercado encontra-se kits compostos de uma “Unidade de Controle Eletrônico” ou simplesmente UCE, que controla o gás natural injetado. Este kit composto pela UCE, também possui um sistema gerenciador de gás natural, uma válvula de fluxo, um misturador ou difusor, um detector de *knock* e um transdutor de potência, como mostra a Figura 13.



Figura 13 – Esquema do kit *Dual Fuel*.

Fonte: Adaptada de [http://www.govconsys.com/pdf/Woodward%20Product%20Specifications/Dual\\_Fuel\\_CTech.pdf](http://www.govconsys.com/pdf/Woodward%20Product%20Specifications/Dual_Fuel_CTech.pdf).

O funcionamento do kit *dual fuel* é possível devido a uma configuração programada por um operador especializado. A configuração é feita para que a posição da válvula controladora de fluxo seja correlacionada com os sinais obtidos do motor. Esses sinais são do detector de *knock* e do transdutor de potência, e após coletados, são relacionados com as posições da válvula controladora de fluxo durante um teste preliminar, onde são impostas cargas correspondentes a 10%, 25%, 50%, 75% e 100% da potência do motor. O sistema gerenciador de gás natural é responsável por corrigir a pressão e a vazão do gás, de acordo com a solicitação do motor. O uso de um difusor permite uniformizar a mistura ar/gás natural.

Devido a seu elevado custo, por se tratar de um produto importado, o seu uso ainda é pouco empregado no Brasil. Diante disso, o Laboratório de Inovação da UFPB desenvolveu um kit *Dual Fuel* mantendo os aspectos funcionais do kit importado. A elaboração deste kit, permitiu a redução de custos e a fácil instalação.

Como os aspectos funcionais deveriam ser mantidos, o kit *dual fuel* também permite o funcionamento do motor apenas com diesel, ou no modo dual. No kit *dual fuel* desenvolvido, o microcontrolador utilizado como UCE é um Arduino UNO. O Arduino

é uma plataforma de prototipagem *open-source*<sup>5</sup> destinada à pessoas interessadas em criar objetos ou ambientes interativos. Com o Arduino é possível à interação com luzes, motores, entre outros objetos eletrônicos.

No modelo desenvolvido, o Arduino recebe os sinais oriundos da ocorrência do *missfire*, realiza o processamento, e aciona a válvula controladora. Assim, é determinada a posição da válvula a cada sinal recebido, permitindo que ocorra a máxima substituição de diesel por gás natural em tempo real. Os principais componentes utilizados no kit desenvolvido foram:

- Arduino UNO;
- Motor de passo;
- Válvula controladora de fluxo;
- Difusor; e
- Sistema gerenciador de gás natural.

### 3.2.3 DESEMPENHO DE MOTORES DUAIS

O desempenho dos motores duais, usando diesel e gás natural, depende dos mesmos parâmetros descritos para os motores a diesel, no modo original, considerando agora os limites de substituição do diesel por gás natural.

#### 3.2.3.1 Substituição limite do diesel por gás natural

Os limites de substituição do diesel por gás natural variam de acordo com a carga aplicada ao motor e representam a parcela de diesel que foi reduzida no desenvolvimento de determinada potência, ao se usar o modo dual. Esse parâmetro pode ser calculado pela Eq. (3).

$$LS = \left(1 - \frac{V_{oldual}}{V_{old}}\right) \quad (3)$$

O termo LS significa o limite de substituição do diesel por gás natural, o *V<sub>oldual</sub>* é consumo volumétrico de diesel no modo dual e o *V<sub>old</sub>* é o consumo volumétrico de

---

<sup>5</sup> Plataforma de código livre, baseada em uma placa simples de entradas e saídas, e um ambiente desenvolvido que implementa e processa linguagens.

diesel no modo original. Este fator é essencial nas análises dos motores dual, pois está diretamente relacionado com a economia com o custo de combustível e com as emissões gasosas.

### 3.2.3.2 Rendimento térmico

Na operação de um motor Diesel no modo dual, o rendimento térmico,  $\eta_d$ , é calculado baseando-se no consumo mássico de diesel e de gás natural, ver Eq. 3.2.3.2.

$$\eta_d = \frac{PP}{PCI_d * Vol_d * \rho_d + PCI_g * Vol_g * \rho_g} \quad (3.2.3.2)$$

Onde  $PP$  é a potência produzida,  $PCI_d$  é o poder calorífico inferior do diesel,  $Vol_d$  é o volume de diesel consumido por unidade de tempo,  $\rho_d$  é a massa específica do diesel,  $PCI_g$  é o poder calorífico inferior do gás natural,  $Vol_g$  é o volume de gás natural consumido por unidade de tempo e  $\rho_g$  é a massa específica do gás natural.

### 3.2.3.3 Consumo específico de combustível

O consumo específico de combustível do motor dual ( $cecd$ ) é expresso pela relação entre os consumos mássicos de diesel ( $CM_d$ ) e de gás natural ( $CM_g$ ), e a potência desenvolvida ( $PP$ ), ver Equação 3.2.3.3.

$$cecd = \left( \frac{CM_d + \left( \frac{PCI_g}{PCI_d} \right) * CM_g}{PP} \right) \quad (4)$$

A razão entre o poder calorífico inferior do gás natural ( $PCI_g$ ) e o poder calorífico inferior do diesel ( $PCI_d$ ) é usada com o intuito de corrigir o valor do consumo específico de combustível ao se levar em consideração a diferença entre os poderes caloríficos dos dois combustíveis (EGÚSQUIZA, 2009).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 MONTAGEM DO APARATO EXPERIMENTAL

#### 4.1.1 MOTOR UTILIZADO

Para realização dos testes foi utilizado o grupo gerador a diesel MDG 5000-CLE, ver Figura 14.

Figura 14 – Grupo gerador MDG 5000-CLE.



Fonte: Adaptada de <http://www.grupogmeg.com.br/produto/mdg-5000cle>.

Algumas das características do grupo gerador estão detalhadas na Tab. 2.

Tabela 2 – Especificações do Grupo gerador MDG 5000-CLE.

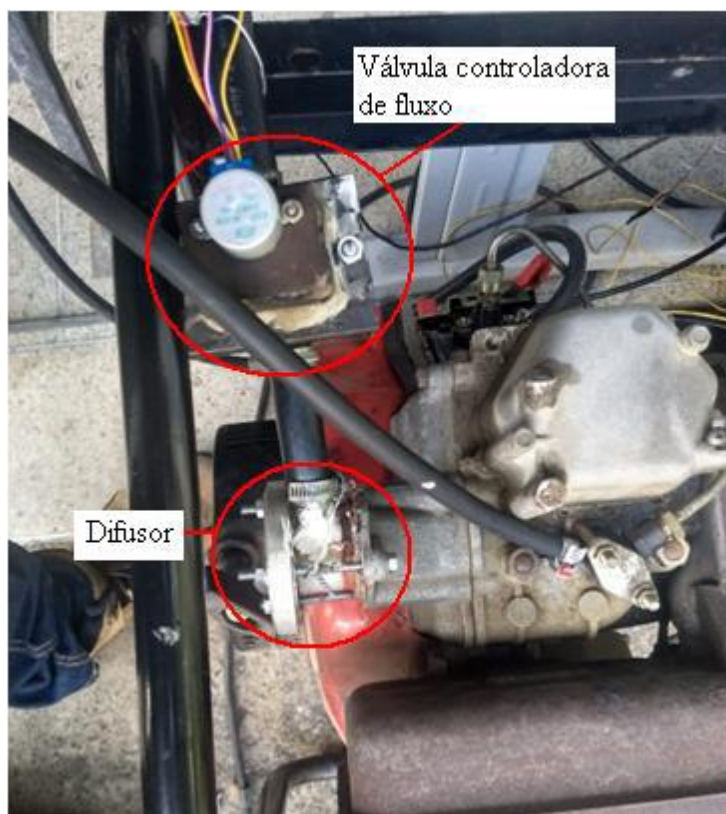
<b>Alimentação</b>	<b>Aspirado</b>
<b>Tipo de injeção</b>	<b>Mecânica</b>
<b>Potência Prime</b>	<b>4,6 kWe</b>
<b>Tipo de motor</b>	<b>4T</b>
<b>Meio de refrigeração</b>	<b>Ar</b>
<b>Número de cilindros</b>	<b>1</b>
<b>Rotação</b>	<b>1800 RPM</b>

#### 4.1.2 KIT DUAL FUEL DESENVOLVIDO

O kit *Dual Fuel*, de baixo custo, desenvolvido pelo LI foi instalado na admissão do gerador MDG 5000-CLE, ver Fig. 15. Os componentes do kit são:

- Válvula controladora de fluxo;
- Motor de passo;
- Difusor;
- UCE.

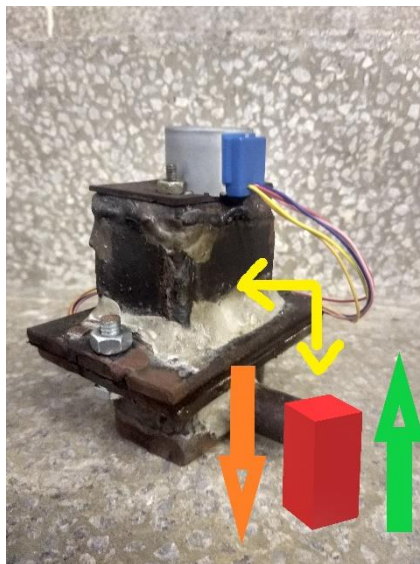
Figura 15 – Componentes do kit Dual Fuel no motor MDG 5000-CLE.



A válvula controladora de fluxo foi elaborada de maneira que a vazão do gás fosse controlada automaticamente, através de sinais enviados pelo *Arduino UNO*. Os sinais determinavam o movimento da cunha da válvula, permitindo a dosagem correta do gás introduzido na admissão do motor (Figura 16). A cunha é indicada pelo desenho

vermelho, e realizava o movimento vertical (como indicado nas setas laranja e verde) de acordo com os sinais recebidos do Arduino.

Figura 16 – Ilustração do movimento da cunha da válvula controladora de fluxo.



#### 4.1.3 BANCO DE CARGA E ANALISADOR DE ENERGIA UTILIZADOS

Usou-se nos testes de desempenho, um banco de cargas resistivas elaborado no LI com capacidade máxima de 5 kWe e mínima de 500 We, para impor as cargas ao grupo gerador do motor MDG 5000-CLE (Figura 17).

Figura 17 – O banco de carga utilizado.



O banco de carga desenvolvido é composto por 10 resistências elétricas de 500 W  $\pm$  5%, que são acionadas por chaves liga-desliga.

Para verificação das cargas aplicadas, bem como a tensão, corrente e frequência da geração, foi utilizado o analisador de energia da marca HIOKI, modelo 3197 (Ver Figura 18).

Figura 18 – Analisador de energia.

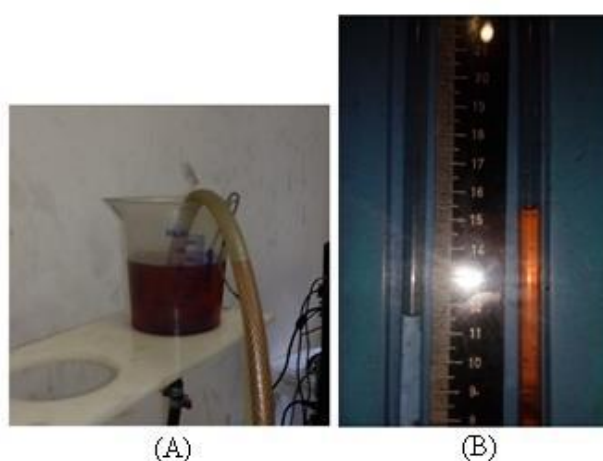


Fonte: <https://www.testequity.com/products/2700/>

#### 4.1.4 SISTEMA DE MEDIÇÃO DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

Para realização da medição do consumo mássico de combustível no Grupo gerador MDG-5000CLE foram utilizados um recipiente graduado (Becker) com faixa nominal de 600 ml e resolução de 10 ml, para medição do consumo volumétrico do diesel, ver Fig. 19 (A), e um tubo em U, para a medição da massa específica do diesel, ver Fig. 19 (B)

Figura 19 – (A) Recipiente graduado e (B) tubo em U.



Fonte: Alves, 2018.

#### 4.1.5 SISTEMA DE MEDIÇÃO DE CONSUMO DE GÁS NATURAL

O consumo de gás natural utilizado durante os testes no modo dual foi realizado com o auxílio de um sistema de medição instalado pela PBGÁS, ver Fig. 20. A PBGÁS é a Companhia Paraibana de Gás, que por meio de convenio com o LI fornece o gás natural utilizado nos testes.



Figura 20 – Sistema de medição volumétrica de gás natural.



Fonte: Alves, 2018.

Esse sistema possui um leitor analógico e um digital. O instrumento digital tem uma resolução 1000 vezes menor do que o analógico e por isso, as medidas do consumo volumétrico de gás natural, durante os testes no modo dual, são efetuadas no leitor digital.

#### 4.1.6 MEDIÇÃO DA OPACIDADE DOS GASES DE ESCAPE

A opacidade dos gases de escape do Grupo gerador MDG-5000CLE foram registrados pelo opacímetro da marca Tecnomotor, modelo TM 133, ver Fig. 21. O opacímetro, da Tecnomotor, se comunica com um software, o IGOR 2.1, o qual deve ser instalado no computador em que o opacímetro esteja conectado. Na medição da opacidade, esse opacímetro coleta 10 amostras dos gases de escape, faz a análise automática e calcula a média aritmética a partir dos valores medidos.

Figura 21 – O opacímetro utilizado.



## 4.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 4.2.1 TESTE DE DESEMPENHO DO GRUPO GERADOR MDG-5000CLE COM DIESEL

Para realização dos testes com o Grupo gerador MDG-5000CLE foram realizadas algumas atividades que estão descritas abaixo:

- Promovia-se o abastecimento do diesel no recipiente graduado, completando sua capacidade;
- Fazia-se a inicialização do software de medição, que trabalha em conjunto com o opacímetro;
- Checava-se o banco de cargas, e as ligações do mesmo com o Grupo gerador MDG-5000CLE através de cabos;
- Avaliava-se a massa específica do diesel;

Depois dessas etapas, acionava-se o Grupo gerador, ficando em funcionamento sem imposição de cargas por aproximadamente 5 minutos. Após esse tempo de aquecimento, iniciava-se a aplicação das cargas. A etapa de aplicação de cargas foi composta de cinco momentos, sendo eles correspondentes às potências de 1,14; 2,14; 3,25; 4,24; e 4,69 kW. O Grupo gerador permanecia em funcionamento durante quatro

minutos em cada carga, e ao fim desse tempo eram registradas as grandezas correspondentes a: consumo de combustível, opacidade dos gases, e níveis de ruídos. Após registradas as grandezas, seguia-se o mesmo procedimento para as cargas posteriores até a última carga de 4,69 kW.

#### 4.2.2 TESTE DE DESEMPENHO DO GRUPO GERADOR MDG-5000CLE DUAL (DIESEL + GÁS NATURAL)

Para operação no modo dual, instalou-se o kit *Dual Fuel*, já referido no item anterior, e na sequência foi dado partida no motor, fazendo-o funcionar de forma dual.

## 5 RESULTADO E DISCUSSÃO

Os tópicos seguintes estão destinados a apresentação dos resultados dos testes de desempenho envolvendo o Grupo gerador MDG-5000CLE, no modo original e no modo dual. Foi realizada uma análise comparativa dos resultados advindos, quando se operou o motor nos dois modos, levando-se em conta, inclusive, considerações com custo de combustíveis.

### 5.1 TESTES DE DESEMPENHO NO GRUPO GERADOR MDG-5000CLE

#### 5.1.1 OS LIMITES DE SUBSTITUIÇÃO DO DIESEL POR GÁS NATURAL EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA

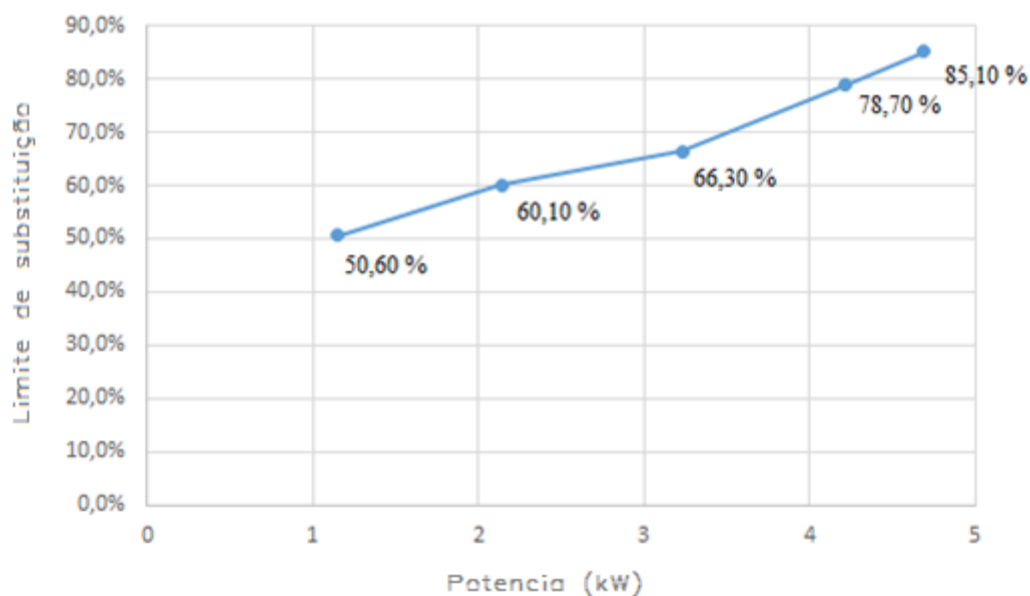
A máxima substituição do diesel por gás natural é quantificada a partir da Eq. (3). Através dela foi calculado para o Grupo gerador MDG-5000CLE o limite de substituição na operação do modo dual. A Tabela 3 detalha o consumo do Grupo gerador nas potências nas quais os testes foram realizados.

Tabela 3 – O consumo de combustível no modo original e no modo dual em relação a potência, e seus respectivos tempos de consumo.

Potência (kW)	Tempo (s)	Consumo (ml) – Modo Dual	Tempo (s)	Consumo (ml) – Modo Original
1,15	340	50	168	50
2,14	330	50	132	50
3,23	323	50	109	50
4,21	339	50	72	50
4,69	370	50	55	50

A Figura 22 ilustra os valores dos limites de substituição do diesel por gás natural.

Figura 22 – Limites de substituição do diesel em função da potência.

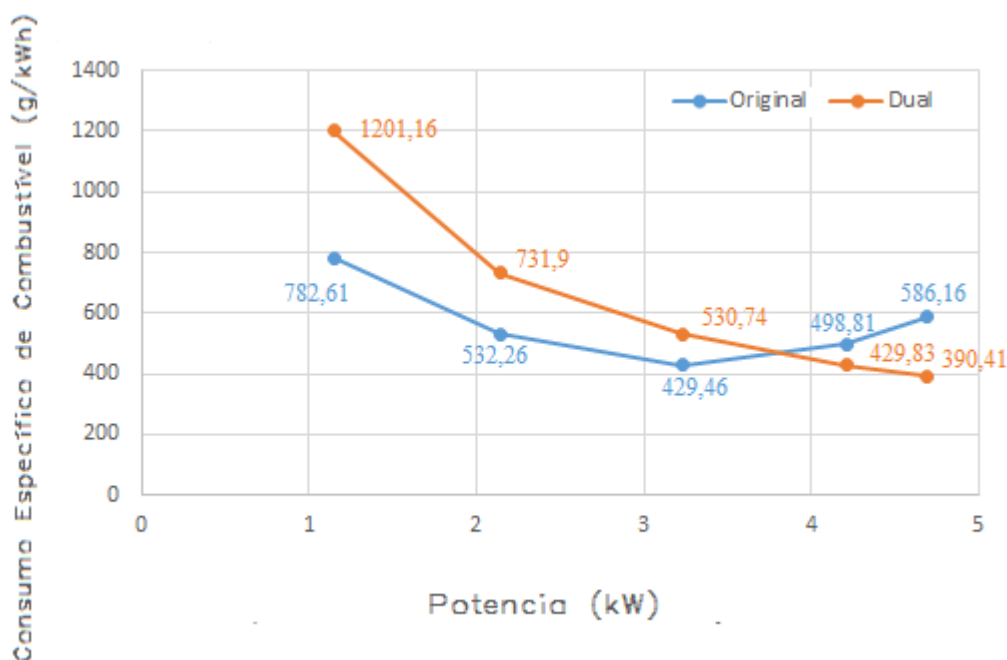


Nota-se na Fig. 22, o aumento do limite de substituição do diesel por gás natural cresce quando a potência cresce. De acordo com as análises, para esse grupo gerador, na potência de 1,15 kW ocorre a substituição mínima de 50,60%, e na potência de 4,69 kW, que é a potência nominal, ocorre a substituição máxima, que é de aproximadamente 85,10 %.

#### 5.1.2 CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTÍVEL *VERSUS* POTÊNCIA

O consumo específico de combustível é dado para o modo original pela Eq. (2) e no modo dual pela Eq. (5). Ambas as equações correlacionam à quantidade total de combustível consumida com a potência gerada. A Fig. 23 exhibe a relação entre a potência e os consumos específicos.

Figura 23 – Comparação entre consumo específico e potência para o modo original e dual.



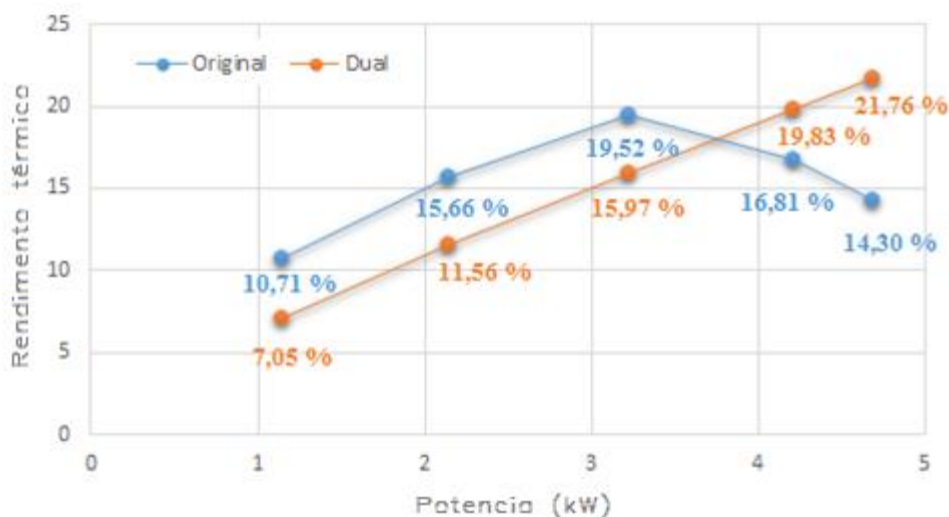
Percebe-se que o consumo específico do modo dual é inferior ao do modo original em potências aproximadamente acima de 3,5 kW, ou seja, quando aproxima-se da potência nominal. O menor valor de consumo específico de combustível no modo dual foi de 390,41 g/kW.h na potência de 4,69 kW, sendo assim, 195,75 g/kW.h a menos do que o modo original para mesma potência.

Para o cálculo foi utilizado a densidade do diesel no valor de 0,840 g/ml, e a massa específica do gás 0,78 Kg/m<sup>3</sup>.

### 5.1.3 RENDIMENTO TÉRMICO *VERSUS* POTÊNCIA

O rendimento térmico é calculado no modo original pela Eq. (1) e no modo dual pela Eq. (4). A Fig. 24 reproduz os rendimentos térmicos para o modo de operação original e dual.

Figura 24 – Comparação entre os rendimentos térmico no modo original e dual.



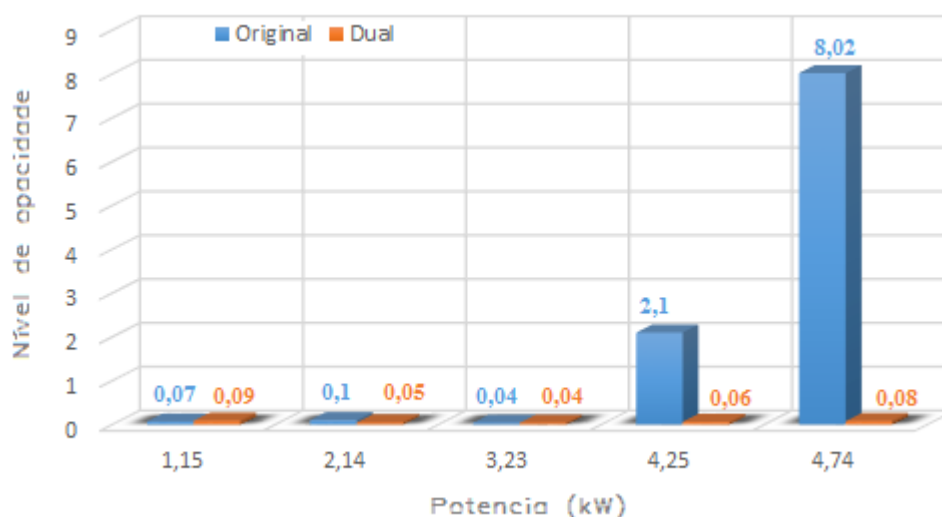
Nota-se que nos dois modos de operação, o rendimento térmico cresce à medida que a potência do grupo gerador aumenta, exceto no modo original, onde ocorre um decaimento do rendimento entre as potências 3,23 kW e 4,21 kW, passando de 19,52% para 16,81%, respectivamente. Analisa-se ainda que até a potência de 3,23 kW o modo original apresenta um maior rendimento do que no modo dual. O modo dual apresenta um maior rendimento em potências aproximadamente maiores do que 3,5 kW, chegando até 21,76 % na potência de 4,69 kW.

#### 5.1.4 A OPACIDADE DOS GASES *VERSUS* POTÊNCIA

O teste de opacidade tem como objetivo avaliar quão escura está a fumaça emitida pelo motor inspecionado, em unidade de  $\text{m}^{-1}$ . A característica opaca da fumaça que sai no escape é causada pelos particulados sólidos de carbono presentes na mesma. Assim, a opacidade dos gases de exaustão é relacionada com os níveis de particulados.

A Fig. 25 reproduz os níveis de opacidade para o modo original e dual, em relação a potência nos testes feitos com o Grupo gerador MDG-5000CLE.

Figura 25 – Opacidade dos gases de escape em relação à potência para os modos original e dual.



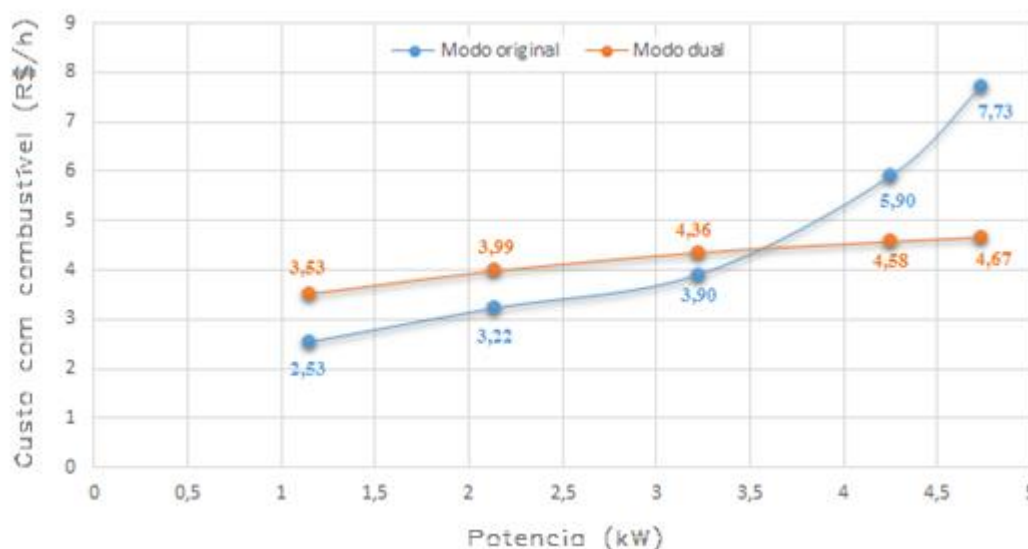
Nota-se através da Fig. 25, que até a potência de 3,23 kW tanto o modo original, como o dual apresentam, praticamente, os mesmos níveis de opacidade. Na quarta e quinta potência ocorrem altas desproporcionais de níveis de opacidade com relação ao modo original, tendo sido registrados naquela situação analisada 2,1 e 8,02  $\text{m}^{-1}$ , respectivamente. Essa alta desproporcional pode estar relacionada com a combustão incompleta do diesel, fazendo com que o combustível entre em combustão no processo de escape, elevando assim a sua opacidade.

## 5.2 CUSTO DOS COMBUSTÍVEIS *VERSUS* POTÊNCIA, NO MODO ORIGINAL E DUAL.

A Fig.26 apresenta a comparação dos custos com combustível por hora, em função da potência nos modos original e dual. As curvas foram traçadas levando-se em conta o preço médio do diesel nas refinarias, ao custo de R\$ 2,36 o litro, e do preço do  $\text{m}^3$  do gás natural, de acordo com a PBGÁS, custando R\$ 1,96 o metro cubico. Ambas as consultas se deram na primeira quinzena de outubro de 2018.



Figura 26 – Custo com combustível em função da potência para o modo original e dual.



Nota-se na Fig. 26, que mesmo no modo dual o custo com combustível por hora é mais caro do que no modo original até a terceira potência examinada, isto é, 3,24 kW. Nas potências seguintes e mais elevadas, percebe-se que o modo dual é mais econômico em relação ao modo original, resultando em uma economia de 22,37% na potência de 4,21 kW, e de 39,59% na potência de 4,69 kW.

Logo, a economia com o custo combustível por hora utilizando o kit *Dual Fuel* no modo dual chega a patamares de 40% na potência nominal, levando à resultados satisfatórios e compensatórios que justificam o investimento com a introdução do kit *Dual Fuel*, de baixo custo, desenvolvido pelo Laboratório de Inovação da UFPB.

## 6 CONCLUSÃO

Com base nos testes realizados no Grupo Gerador MDG-5000CLE operando no modo original e no modo dual (gás natural e diesel), podemos concluir que:

1. Em concordância com a finalidade desse trabalho, foi possível a realização dos testes no Grupo gerador para todas as potências tanto no modo original como no modo dual, com a instalação do kit *Dual Fuel*.
2. Em relação ao limite de substituição do diesel por gás natural, foi notado seu crescimento de acordo com aumento da potência solicitada ao grupo gerador. Na potência inicial de 1,14 kW o limite de substituição máximo foi de 50,60 %, e na potência final de 4,69 kW, o limite de substituição máximo foi de 85,10%.
3. Foi constatado que até a potência do terceiro ponto, 3,23 kW, o consumo específico de combustível foi menor no modo original, e no quarto e quinto ponto, 4,21 e 4,69 kW, respectivamente, o consumo específico de combustível se tornou mais viável com o modo dual.
4. O rendimento térmico segue o que já vinha sendo constatado na conclusão anterior. A partir da quarta potência, o modo dual apresentou maiores rendimentos que o modo original.
5. As opacidades dos gases de escapamento foram maiores durante a operação no modo original do que no modo dual, exceto na potência de 1,14 kW. O registro de maior opacidade foi obtido na potência de 4,69 kW do modo original, chegando à  $0,08 \text{ m}^{-1}$ .
6. E por último, os custos com combustível foram menores no modo dual a partir ~3,5 kW, chegando até a redução de 39,59% na quinta potência, 4,69 kW.

## REFERENCIAS

ALVES, A.F.M. 2018. **ANÁLISE DE DESEMPENHO DE MOTORES DUAIS (DIESEL E GÁS NATURAL) OPERANDO COM UM KIT DUAL FUEL DE BAIXO CUSTO**. Qualificação de doutorado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Federal da Paraíba. Orientador: Emerson Freitas Jaguaribe.

ANP, 2018 “**Gás Natural**”. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/gas-natural>

**Balanco Energético Nacional 2018, ano base 2017** – Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2018>

BRUNETTI, F. **Motores de Combustão Interna – Volume 1**. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 2012.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. 7. ed. Mc Graw Hill, 2013.

EGÚSQUIZA, J.C.; BRAGA, S.L.; BRAGA, C.V.M. “*Performance and Gaseous Emissions Characteristics of a Natural Gas/Diesel Dual Fuel Turbocharged and Aftercooled Engine*”, 2009, ABCM, Vol. XXX I, No. 2, April-June.

FIGUEIRAL, C. M. **APLICAÇÃO DO CONCEITO DE COMBUSTÃO DUAL-FUEL NUM MOTOR DIESEL PESADO**, 2016.

**MAQUINAS E MOTORES UTILIZADOS NA PESCA – UFRPE**. Disponível em: [http://maquinasemotoresnapesca.blogspot.com/p/blog-page\\_21.html](http://maquinasemotoresnapesca.blogspot.com/p/blog-page_21.html)

PBGAS, 2018 “**O QUE É GÁS NATURAL?**” Disponível em: [http://www.pbgas.com.br/?page\\_id=195](http://www.pbgas.com.br/?page_id=195)

SHENGHUA, L.; LONGBAO, Z.; ZIYAN, W.; JIANG, R. “*Combustion characteristics of compressed natural gas/diesel dual-fuel turbocharged compressed ignition engine*”, 2003, Proc. Instn Mech. Engrs Vol. 217 Part D: J. Automobile Engineering.

WYLEN, G. J. V., SONNTAG, R. E., BORGNAKE, C. **Fundamentos da termodinâmica**, tradução da 5 ed. americana: Euryale de Jesus Zerbini. São Paulo: Edgard Blücher, 2003.

ZOLTOWSKI, A. “*Knock combustion in dual fuel diesel engine*”, 2014, *Journal of KONES Powetrain and Transport*, Vol. 12, N° 4.